第46卷 第6期
2023年6月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

近60 a哈密市极端气温时空变化特征

陈跃萍[1,2]， 武胜利[1,2]， 赵 昕[1,2]， 张艺加[1,2]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘 要： 选取哈密国家气象基准站1961—2019年日最高与最低气温气象资料，采取一元线性回归法、10 a滑动平均、Mann-Kendall法、滑动 t 检验和主成分分析法等方法对哈密市极端气温时空变化特征进行分析，为预测未来气温变化趋势，增强对极端气温事件的应对能力，减轻气象灾害对哈密市农业生产造成的危害提供一定依据。结果表明：(1) 哈密市极端气温指数变化具有不对称性，冷暖指数变化相反，夜指数变暖幅度大于昼指数。季节上看，大部分极端气温指数在夏季、秋季变化幅度更大。(2) 近60 a来哈密市极端低温事件频率显著降低，其中霜冻日数下降最为显著，下降幅度为−4.59 d·(10a)$^{-1}$；极端高温事件频率增加、强度显著增强；生长季度长与热持续指数变化幅度趋于一致，冷持续指数变化相反。(3) 极端气温冷指数对气候变化更为敏感，突变发生在20世纪80年代中和90年代末，暖指数和持续指数突变时间为20世纪90年代末。(4) 2个主成分累计方差贡献率为76.453%，极端气温事件变化与气温变暖相关性较高，冷暖指数呈负相关，冷夜日数、冷昼日数、霜冻日数、暖夜日数、暖昼日数是哈密市气温升高的主要因素。

关 键 词： 极端气温指数；时空变化；突变检验；哈密市

文章编号： 1000－6060(2023)06－0868－12(0868～0879)

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出，2010—2019年全球平均表面温度升高约为1.07 ℃，并指出未来20 a内，全球地表温度升高预计超过1.5~2.0 ℃[1]。近百年来，中国气温变化处于明显的上升趋势，年均地表温度上升约0.20~0.52 ℃·(10a)$^{-1}$[2]。在全球变暖背景下，气候变化正在以多种方式影响着地球上每个区域。其中，极端气候事件，如极端气温、暴雨洪涝等，对人类社会、经济和农业产生了重要影响[3]。

目前，国内外许多学者针对不同区域极端气候事件变化特征及其规律进行了分析研究[4-7]。在全球范围上，Alexander等[5]对全球极端气温事件进行分析，发现全球70%以上的陆地地区，冷夜显著减少，暖夜显著增加；Song等[6]对1981年以来全球极端气温事件的时空变化分析发现，全球热浪和寒潮的发生频率每10 a分别增加了2.7倍和6.4倍，并存在较大的区域差异。在中国，郑景云等[7]研究发现，1950年后中国曾多次出现过极端冷冬等寒冷事件，在此期间较温暖时期也出现过超20世纪极端记录的炎夏；王岱等[8]研究中国极端气温季节变化发现，整体上看，极端气温存在变暖减缓或变冷现象，区域上看，不同区域不同季节极端气温变化存在差异。对于西北地区，齐月等[9]研究表明，近50 a来气温整体呈上升趋势，极端高温事件与极端低温事件发生频率呈负相关；曲姝霖等[10]研究得出，西北地区极端高温事件呈增加趋势，高值中心主要集中在新疆、青海、甘肃和宁夏地区。新疆由于其独特的地理位置，生态环境较为脆弱，从而对气候变化非常敏感[11]，幅员辽阔和地形复杂也使得其内部气候变化趋势不同[12]。张延伟等[13]利用34个气象站点的气温和降水数据分析北疆地区极端气候事件，结果表明该区高温和低温事件强度、频数呈显著增加

收稿日期： 2022-09-25； **修订日期：** 2022-11-02
基金项目： 新疆维吾尔自治区科技支撑专项(HY-2.3)资助
作者简介： 陈跃萍(1999-)，女，在读硕士，主要从事干旱区环境演变与气象变化研究. E-mail: 2227174379@qq.com
通讯作者： 武胜利(1977-)，男，教授，主要从事干旱区环境演变与气象变化研究. E-mail: wushengli77@126.com

趋势。高婧等[14]利用10个极端气温指数分析塔城地区极端气温变化特征得出，塔城北部地区变暖幅度大于南部地区，冷指数与暖指数变化呈不对称性。虽然已有众多学者对新疆极端气候事件进行了研究，但多是大尺度区域研究，小尺度区域研究较少。哈密市位于新疆东部，地处亚欧大陆中部，天山山脉横亘其上，特殊的自然地理条件使哈密市兼具南北疆气候特点。哈密市属典型的温带大陆性干旱气候，炎热干燥、干旱少雨，是我国最酷热干燥的地区之一，也是重要的畜牧业和瓜果生产基地，有着丰富的生物资源，气候变化特别是极端气候事件的发生会严重影响该区农牧业发展。本文利用哈密市6个气象站点逐日最高、最低气温数据，通过RClimDex 1.0计算15个极端气温指标，分析该区极端气温时空变化特征，为预测未来气温变化趋势，增强对极端气温事件的应对能力，减轻气象灾害对哈密市农业生产造成的危害提供一定依据。

1 研究区概况

哈密市位于新疆最东端，地理位置介于91°06′~96°23′E、40°52′~45°05′N之间(图1)。天山横亘于哈密，山北雪山冰川、森林草地浑然一体，山南盆地为戈壁大漠环绕，总面积14.21×10^4 km^2，下辖一区两县。该区为典型的温带大陆性干旱气候，由于地形起伏较大，形成春季多风、夏季酷热、秋季晴朗、冬季寒冷的特点。该地年均温9.8 ℃，极端高温43 ℃，极端低温-32 ℃，多年平均年降水量33.8 mm。哈密市水资源以冰雪融水和地下水为主。此外，还有丰富的草地、林地、森林、野生动植物和矿产资源，气候变化特别是极端气候事件的发生会严重影响哈密市农牧业发展。

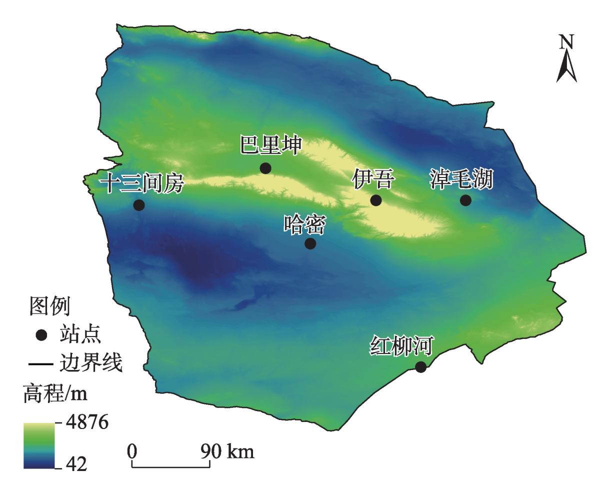


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

本文选取数据来自6个国家气象地面基准站[15](巴里坤、哈密、红柳河、淖毛湖、十三间房、伊吾)，依据气象数据的连续性和最长时间段等原则选取1961—2019年日最高与最低气温数据，按新疆独特的地理环境将季节划分为春季(4—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—10月)、冬季(11月—次年3月)。利用RClimDex 1.0软件分别计算哈密市6个站点15个极端气温指数[3](表1)。对气象数据进行质量控制，包括缺测值、异常值和错误值(如日最高温<日最低温)，三者总占比0.142%。采取一元线性回归法、10 a滑动平均、Mann-Kendall法、滑动t检验、主成分分析法和反距离加权插值法[12]等方法对哈密市极端气温的时间变化趋势、突变性、空间变化以及相关性进行分析。

3 结果与分析

3.1 时间变化特征

3.1.1 *趋势变化* 近60 a哈密市极端气温冷指数从年际变化来看(图2a~f)，除日最低气温极低值(TNn)和日最高气温极低值(TXn)外，均呈下降趋势，倾向率绝对值自高向低为：霜冻日数(FD0)>冷夜日数(TN10P)>冷昼日数(TX10P)>冰冻日数(ID0)>TNn>TXn。TNn和TXn变化规律一致，总体呈大幅波动上升，倾向率分别为0.65 ℃·(10a)$^{-1}$和0.30 ℃·(10a)$^{-1}$，在1980前波动幅度较大，此后波动变小呈上升趋势。FD0和TN10P均呈持续下降趋势，下降速率分别为-4.59 d·(10a)$^{-1}$和-1.90 d·(10a)$^{-1}$；TX10P在1960—1970年呈小幅度上升趋势，此后呈下降趋势，下降速率为-1.16 d·(10a)$^{-1}$；ID0在1985—1990年波动幅度较小，其余均呈大幅波动，变化率为-1.09 d·(10a)$^{-1}$。在季节尺度上(表2)，TNn、TX10P和TN10P四季均通过0.05显著性检验，TXn只有夏、秋、冬季通过检验。其中，TNn和TXn各季节变化较小且均匀，TNn在冬季上升幅度最大0.70 ℃·(10a)$^{-1}$，春季最小为0.57 ℃·(10a)$^{-1}$；TXn在秋季上升幅度最大为0.36 ℃·(10a)$^{-1}$，春季最小为

0.19 ℃·(10a)$^{-1}$。TX10P四季均呈下降趋势，下降速率分别为−0.94 d·(10a)$^{-1}$、−1.33 d·(10a)$^{-1}$、−1.10 d·(10a)$^{-1}$和−1.11 d·(10a)$^{-1}$，春季呈持续下降趋势，夏季在1960—1970年缓慢上升，后呈下降趋势，秋季和冬季在1960—1985年呈上升趋势，此后呈波动下降。TN10P分别以−1.71 d·(10a)$^{-1}$、−2.14 d·(10a)$^{-1}$、−2.06 d·(10a)$^{-1}$和−1.68 d·(10a)$^{-1}$呈持续波动下降趋势，表现为冬季最小，夏季最大。

近60 a来哈密市暖指数表现为不同程度上升趋势(图2g~l)。从年际变化看，夏日日数(SU25)、暖夜日数(TN90P)、暖昼日数(TX90P)、热夜日数(TR20)、日最低气温极高值(TNx)和日最高气温极高值(TXx)均通过0.05显著性检验呈显著上升趋势，TNx上升最微弱，上升速率为0.53 ℃·(10a)$^{-1}$；其中，TR20和TXx上升最为显著，在20世纪90年代中期向上波动最大，上升速率为4.06 d·(10a)$^{-1}$和4.12 ℃·(10a)$^{-1}$；SU25以3.51 d·(10a)$^{-1}$的年际倾向率上升，20世纪90年代中期前呈缓慢波动上升，此后呈大幅波动上升；相对指数TN90P的上升幅度是TX90P的两倍多，分别为3.85 d·(10a)$^{-1}$和1.76 d·(10a)$^{-1}$。在季节尺度上(表2)，TX90P和TN90P在春、夏、秋、冬季的上升幅度均较为明显，变化规律一致。夏季最大，上升速率分别为3.00 d·(10a)$^{-1}$和5.35 d·(10a)$^{-1}$；冬季最小，上升速率分别为1.09 d·(10a)$^{-1}$和2.54 d·(10a)$^{-1}$，且均通过0.05显著性检验。TXx在春季和冬季上升幅度一致为0.32 ℃·(10a)$^{-1}$，夏季和秋季略小分别为0.28 ℃·(10a)$^{-1}$和0.26 ℃·(10a)$^{-1}$；TNx季节变化则与TXx相反，夏季和秋季上升

表1　极端气温指数定义

Tab. 1　Definitions of extreme temperature indices

分类	指数	代码	单位	定义
冷指数	霜冻日数	FD0	d	一年中日最低气温<0 ℃的日数
	冷夜日数	TN10P	d	日最低气温<10%分位值的日数
	冷昼日数	TX10P	d	日最高气温<10%分位值的日数
	冰冻日数	ID0	d	日最高气温<0 ℃的日数
	日最低气温极低值	TNn	℃	年日最低气温的最小值
	日最高气温极低值	TXn	℃	年日最高气温的最小值
暖指数	夏日日数	SU25	d	日最高气温>25 ℃的日数
	暖夜日数	TN90P	d	日最低气温>90%分位值的日数
	暖昼日数	TX90P	d	日最高气温>90%分位值的日数
	热夜日数	TR20	d	日最低气温>20 ℃的日数
	日最低气温极高值	TNx	℃	年日最低气温的最大值
	日最高气温极高值	TXx	℃	年日最高气温的最大值
持续指数	生长季度长	GSL	d	连续6 d>5 ℃或<5 ℃的时间跨度
	冷持续指数	CSDI	d	连续6 d最低气温在10%分位值的日数
	热持续指数	WSDI	d	连续6 d最高气温在90%分位值的日数

表2　1960—2019年哈密市极端气温指数变化幅度

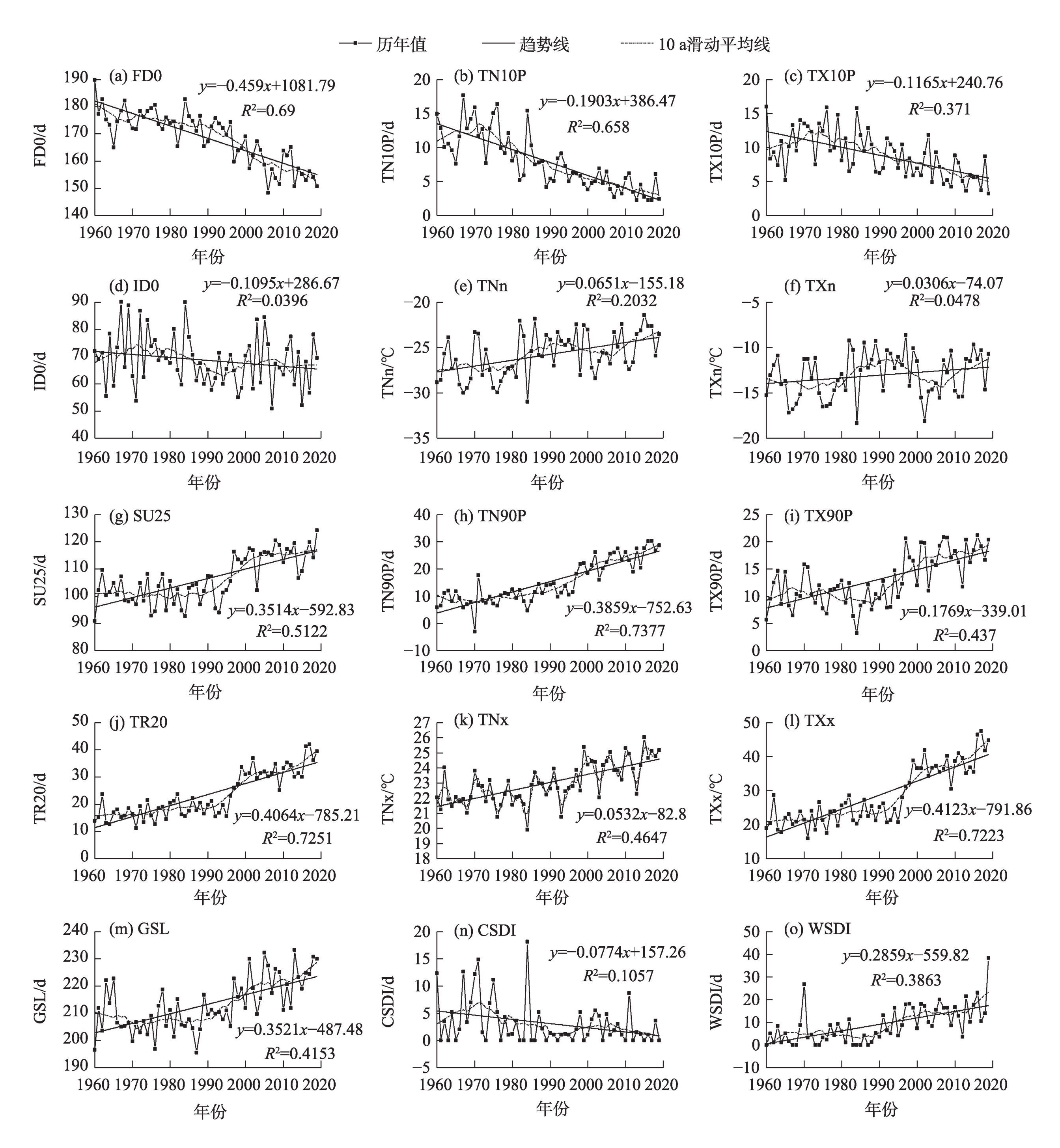
Tab. 2　Variations in the extreme temperature index in Hami City from 1960 to 2019

指数	年	春季	夏季	秋季	冬季
TNn/℃·(10a)$^{-1}$	0.65*	0.57*	0.67*	0.58*	0.70*
TXn/℃·(10a)$^{-1}$	0.30	0.19	0.33*	0.36*	0.29*
TX10P/d·(10a)$^{-1}$	−1.16*	−0.94*	−1.33*	−1.10*	−1.11*
TN10P/d·(10a)$^{-1}$	−1.90*	−1.71*	−2.14*	−2.06*	−1.68*
TXx/℃·(10a)$^{-1}$	4.12*	0.32*	0.28*	0.26*	0.32*
TNx/℃·(10a)$^{-1}$	0.53*	0.49*	0.53*	0.55*	0.46*
TX90P/d·(10a)$^{-1}$	1.76*	1.65*	3.00*	1.33*	1.09*
TN90P/d·(10a)$^{-1}$	3.85*	3.98*	5.35*	3.25*	2.54*

注：*表示通过0.05显著性检验水平。

速率略高分别为0.53 ℃·(10a)$^{-1}$和0.55 ℃·(10a)$^{-1}$，而春季和冬季分别为0.49 ℃·(10a)$^{-1}$和0.46 ℃·(10a)$^{-1}$，均通过0.05显著性检验。

近60 a来哈密市持续指数变化表现如图2m~o，生长季度长（GSL）和热持续指数（WSDI）变化趋势一致，而冷持续指数（CSDI）变化趋势则与前两者相反。其中，GSL和WSDI呈持续上升趋势，但两者上升幅度存在差异，GSL呈大幅波动上升，上升速率为3.52 d·(10a)$^{-1}$，WSDI呈小幅波动上升，上升速率为2.85 d·(10a)$^{-1}$。CSDI在1960—1985年波动幅度较



注：FD0为霜冻日数；TN10P为冷夜日数；TX10P为冷昼日数；ID0为冰冻日数；TNn为日最低气温极低值；TXn为日最高气温极低值；SU25为夏日日数；TN90P为暖夜日数；TX90P为暖昼日数；TR20为热夜日数；TNx为日最低气温极高值；TXx为日最高气温极高值；GSL为生长季度长；CSDI为冷持续指数；WSDI为热持续指数。下同。

图2 1960—2019年哈密市极端气温指数年际变化

Fig. 2 Interannual variation of extreme temperature index in Hami City from 1960 to 2019

大,此后呈小幅波动下降,下降速率为-0.77 d·(10a)$^{-1}$。

3.1.2 突变特征 采用M-K检验和滑动t检验对选取的15个极端气温指数进行突变分析,FD0、TX10P、ID0、TNn、TXn、SU25、TN90P、TX90P、TR20、TNx、TXx、GSL和WSDI等指数均发生了突变。由图3可知,冷指数TX10P在1998年后下降趋势显著,下降

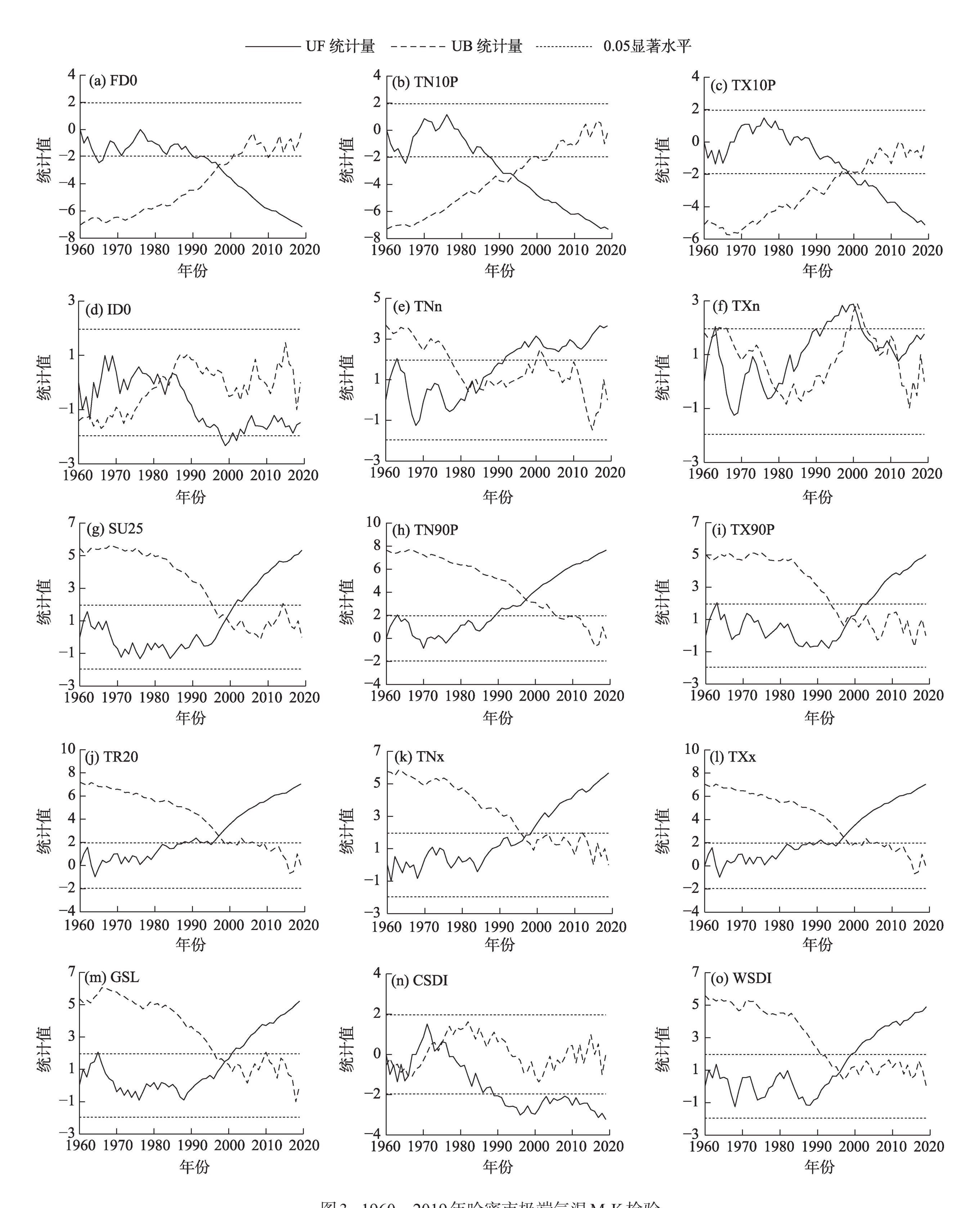


图3 1960—2019年哈密市极端气温M-K检验

Fig. 3 Mann-Kendall test of absolute index of extreme air temperature in Hami City from 1960 to 2019

程度低于0.05显著水平线；TN10P在1976年和1995年超过$t_{0.01}$=2.88（滑动步长N=10），但M-K检验交点年为1993年，不在滑动t检验年限范围内（图略），故TN10P无明显突变。FD0在1997年超过$t_{0.01}$=2.88（N=10），此时UF和UB存在交点，表明FD0在1997年发生突变。ID0、TNn和TXn在M-K检验下均有多个交点，为剔除伪突变点，再使用滑动t检验检测，结果显示：1985年ID0超过$t_{0.01}$=2.88（N=10）和$t_{0.01}$=3.06（N=7），且M-K检验突变年限在此范围内，即ID0在1985年有明显突变；同理，TNn在1982、1985年突变，TXn在2001年突变，TNn上升趋势更明显。暖指数SU25、TX90P和TNx突变时间分别在1999、1999年和1997年，并在2000年后UF超0.05临界线，上升趋势显著。TR20和TXx均在1997年超过$t_{0.01}$=2.88（N=10），且此时M-K检验交点在此范围内，即二者均在1997年突变；同理TN90P在1998年突变，上升趋势显著。持续指数GSL在1999年突变，2000年以前呈波动上升，上升趋势不明显；CSDI在M-K检验时交点较多，为增加可信度，使用滑动t检验再次验证，当N=5时，CSDI在1970年超过$t_{0.01}$=3.36，但此时不在M-K交点年限内，表明CSDI无明显突变；WSDI突变时间在1996年，UF曲线呈先波动上升趋势，2000年后上升趋势更加显著。

3.2 空间变化特征

图4为1960—2019年哈密市极端气温指数倾向率空间分布图，从频率、强度和持续时间3个方面分析。极端气温事件的频率通常用FD0、TN10P、TX10P、ID0、SU25、TN90P、TX90P、TR20表示[16]，且极端高低温事件频次呈现不对称的反方向发生。研究区内所有站点的冷指数除TNn和TXn外，均呈减少趋势。FD0均呈减少趋势，全部站点通过0.05显著性检验，十三间房下降幅度最大为-9.70 d·(10a)$^{-1}$，伊吾最小为-2.00 d·(10a)$^{-1}$；TN10P下降幅度在-0.90~-2.60 d·(10a)$^{-1}$之间，6站点通过0.05显著性检验；与TN10P相比，TX10P变化幅度更小，由东部和西部向中部减少；ID0减少幅度排序为：哈密>十三间房>巴里坤>伊吾>红柳河>淖毛湖，其中只有哈密通过0.05显著性检验。暖指数在各站点均呈不同程度增加趋势。SU25显著增加，增加幅度为：伊吾[4.99 d·(10a)$^{-1}$]>十三间房[4.09 d·(10a)$^{-1}$]>巴里坤[3.50 d·(10a)$^{-1}$]>淖毛湖[3.20 d·(10a)$^{-1}$]>哈密[2.70 d·(10a)$^{-1}$]>红柳河[2.57 d·(10a)$^{-1}$]；TN90P和TX90P增幅趋势一致，均呈自西向东减少趋势，全部站点通过0.05显著性检验；TR20中，全部站点呈上升趋势，巴里坤站和伊吾站未通过0.05显著性检验，处于中部地区。极端气温强度的表示常用指数为TNn、TXn、TNx、TXx，各站点间TNn、TXn、TNx、TXx变化幅度差距较小，其中，暖指数变化较冷指数更大。TNn只有巴里坤和十三间房通过0.05显著性检验，巴里坤增幅为0.90 ℃·(10a)$^{-1}$，十三间房增幅为2.00 ℃·(10a)$^{-1}$；TXn增幅较小，在0.01~0.50 ℃·(10a)$^{-1}$之间，且只有巴里坤、哈密和十三间房变化趋势显著；哈密TNx变化最大，3.41 ℃·(10a)$^{-1}$。总体上看，近60 a来哈密市极端气温强度在增强，哈密和十三间房强度较强。GSL、CSDI、WSDI表示极端气温事件持续事件，GSL与WSDI变化幅度趋于一致，CSDI变化相反。GSL和WSDI上升幅度显著，全部站点通过0.05显著性检验，上升幅度最大均为十三间房，分别为6.88 d·(10a)$^{-1}$、5.30 d·(10a)$^{-1}$。CSDI各站点均呈不同程度减少趋势，巴里坤减少最为显著，减少幅度为-1.73 d·(10a)$^{-1}$。从上述所有站点的变化趋势看，除红柳河站点外，其他大部分变化趋势较大的站点都位于天山山脉附近或被山脉环绕，地形与海拔高度与极端气温变化之间存在密切关系。

3.3 极端气温指数区域差异

为明确哈密市与新疆其他地区以及全球其他地区之间极端气温指数变化差异，表3对比分析了哈密与其他地区的极端气温指数变化幅度。分析表明，哈密地区的极端气温变化趋势与新疆其他地区、全球以及全国其他地区变化趋势总体上一致，但也存在着差异。冷指数在整个哈密市的变化幅度显著高于新疆其他地区和全球变化水平，尤其是FD0、TNn和TXn全部高于其他地区，ID0只略低于天山地区、新疆和青藏高原地区，TX10P则是略低于天山地区、巴音郭楞蒙古自治州（简称巴州）地区和新疆，说明山区的气温变化相对于低谷和平原地区更为敏感。暖指数除TN90P、TX90P外，其余指数变化幅度均高于其他区域，且均通过0.05显著性检验。TN90P较新疆和巴州地区，变化幅度较小，TX90P变化幅度低于新疆、巴州地区和黄土高原。持续指数变化幅度明显高于其他大部分区域。综上所述，新疆哈密市的极端气温指数变化较其他区域表现出明显的差异特征并整体上高于新疆其他

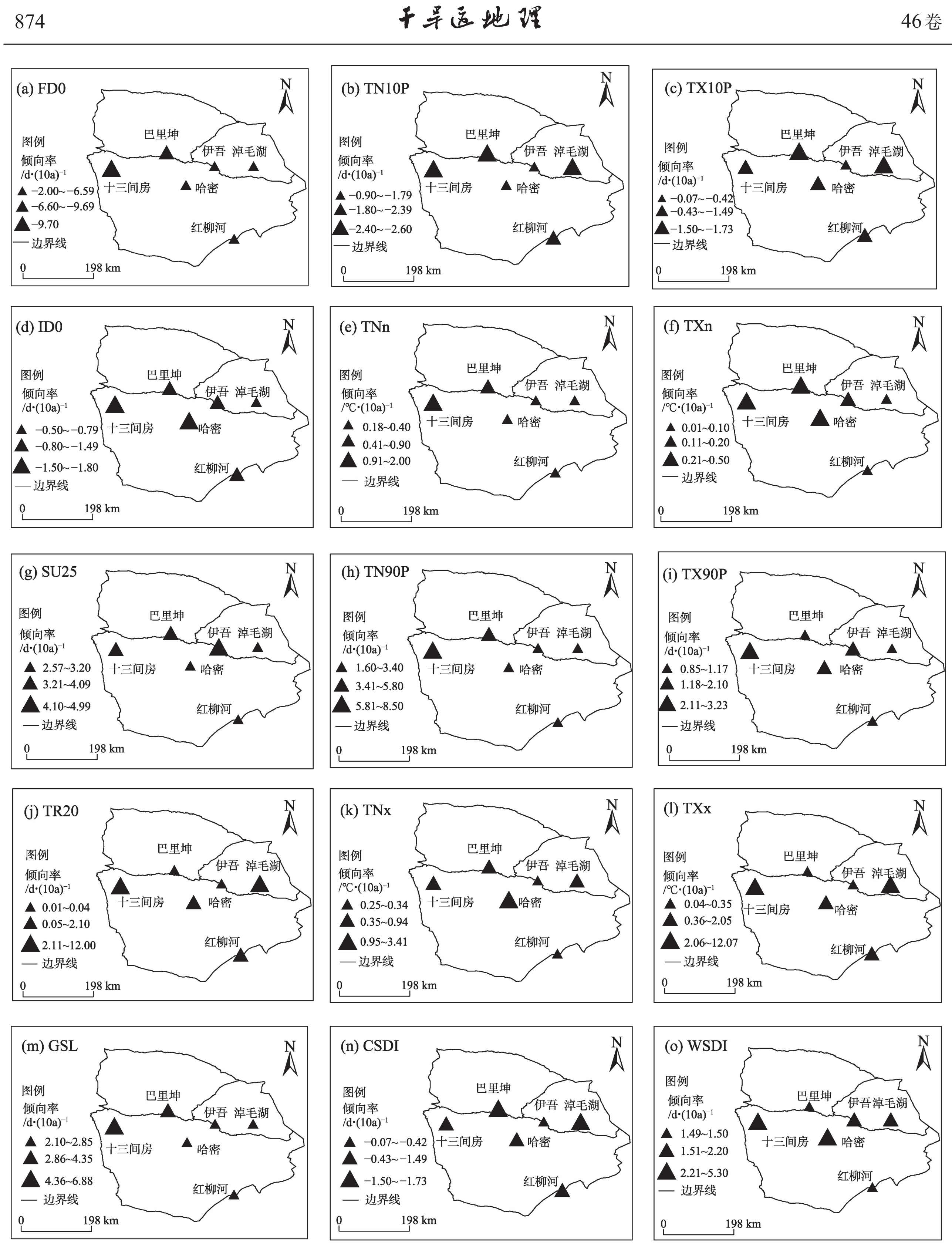


图4 1960—2019年哈密市极端气温指数倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of extreme temperature index propensity rate in Hami City from 1960 to 2019

区域和全国其他区域，表明哈密市是一个极端气温变化较为敏感的区域。

3.4 极端气温指数主成分分析

采用主成分分析法，结果表明：KMO=0.826，因

表3　哈密市极端气温指数变化趋势与其他区域对比

Tab. 3　Comparison of extreme temperature index trends in Hami City with other regions

指数	哈密市	天山地区[15]	巴州地区[16]	阿勒泰地区[3]	新疆[17]	青藏高原[18]	黄土高原[19]	全球[5]
FD0/d·(10a)$^{-1}$	−4.59*	−3.66**	−3.17*	−0.44	−3.69**	−4.32*	−3.46*	–
TN10P/d·(10a)$^{-1}$	−1.90*	−3.56**	−3.55**	−0.36*	−6.57**	−2.38*	−1.86*	−1.26*
TX10P/d·(10a)$^{-1}$	−1.16*	−1.23**	−1.30**	−0.15*	−2.60**	−0.85*	−0.95*	−0.62*
ID0/d·(10a)$^{-1}$	−1.09	−1.16	−0.30	−0.17	−1.61*	−2.46*	–	–
TNn/℃·(10a)$^{-1}$	0.65*	0.62**	0.36*	0.06	–	0.69*	0.44*	0.71*
TXn/℃·(10a)$^{-1}$	0.31	0.29	0.17	0.04	–	0.30*	0.19	0.37
SU25/d·(10a)$^{-1}$	3.51*	1.59**	1.88**	–	2.14**	–	–	–
TN90P/d·(10a)$^{-1}$	3.85*	3.67**	4.67**	0.33*	6.23**	1.58*	1.80*	1.58*
TX90P/d·(10a)$^{-1}$	1.76*	1.73**	2.76**	0.14*	3.59*	1.26*	1.93*	0.89*
TR20/d·(10a)$^{-1}$	4.06*	1.59*	2.66**	–	1.71**	–	–	–
TXx/℃·(10a)$^{-1}$	4.12*	0.09	0.26**	0.18	–	0.28*	0.63*	0.21*
TNx/℃·(10a)$^{-1}$	0.53*	0.34**	0.41**	0.05*	–	0.25*	0.39*	0.30*
GSL/d·(10a)$^{-1}$	3.52*	2.94**	2.60**	0.33*	2.74**	4.25*	3.76*	–
CSDI/d·(10a)$^{-1}$	−0.77*	−1.61**	0.90	–	−1.27**	–	–	–
WSDI/d·(10a)$^{-1}$	2.85*	0.95*	1.73**	–	0.88**	–	–	–

注：“－”表示数据缺失；*和**分别表示通过0.05和0.01显著性检验水平。下同。

表4　哈密市极端气温指数的主成分分析

Tab. 4　Principal component analysis of extreme air temperature indices in Hami City

指数	主成分1	主成分2
FD0	−0.927	−0.103
TN10P	−0.889	0.226
TX10P	−0.843	0.272
ID0	−0.426	0.608
TNn	0.613	−0.664
TXn	0.383	−0.822
SU25	0.875	0.298
TN90P	0.922	0.190
TX90P	0.892	0.135
TR20	0.874	0.363
TNx	0.791	0.161
TXx	0.876	0.363
GSL	0.816	0.148
CSDI	−0.481	0.520
WSDI	0.752	0.170
主成分特征值	9.092	2.376
主成分方差贡献率/%	60.614	15.839

子分析均大于0.502，主成分向原始变量解释程度较高，因子分析效果较好，初始特征值大于1的2个主成分累计方差贡献率达76.453%，符合分析要求（表4）。由表4可知，第一主成分特征值9.092，占方差贡献率的60.614%，表明可用于描述极端气温的变化。其中除了ID0、TXn和CSDI外，各极端气温指数都处于较高载荷值，冷指数FD0、TN10P、TX10P载荷绝对值均在0.842以上，暖指数SU25、TN90P、TX90P、TR20、TNx、TXx载荷值均为正值且大于0.790，持续指数GSL、WSDI均为正载荷，分别为0.816、0.752。相关分析表明（表5），各暖指数间呈正相关（P<0.01），与冷指数（FD0、TN10P、TX10P、ID0）呈负相关。第二主成分占方差贡献率15.839%，ID0、TNn、TXn和CSDI为高载荷指数，后三者之间呈负相关（P<0.01），与其他极端指数呈正相关；其中，冷指数（FD0、TNn、TXn）为负载荷，载荷值分别为−0.103、−0.664、−0.822，暖指数和持续指数均为正载荷，GSL与暖指数呈正相关（P<0.01），与冷指数（FD0、TN10P、TX10P、ID0）呈负相关。综合哈密市近60 a来极端指数变化趋势分析，极端气温事件变化与气温变暖相关性较高，冷暖指数呈负相关，表明哈密市GSL变化主要受到极端低温的影响，极端低温上升是GSL增加的重要原因。

4　讨论与结论

4.1　讨论

近60 a哈密市极端气温变化表现为：极端高温和极端低温均呈上升趋势，冷暖指数变化相反，冷指数下降，暖指数上升，这与新疆[20]和全国[21]极端

表5 哈密市极端气温指数的相关性分析

Tab. 5 Pearson correlation analysis of extreme temperature indices in Hami City

指数	FD0	TN10P	TX10P	ID0	TNn	TXn	SU25	TN90P
FD0	1.000							
TN10P	0.809**	1.000						
TX10P	0.755**	0.862**	1.000					
ID0	0.293*	0.483**	0.513**	1.000				
TNn	−0.516**	−0.643**	−0.589**	−0.549**	1.000			
TXn	−0.275*	−0.459**	−0.455**	−0.516**	0.912**	1.000		
SU25	−0.813**	−0.707**	−0.719**	−0.156	0.316*	0.097	1.000	
TN90P	−0.883**	−0.813**	−0.689**	−0.337**	0.424**	0.180	0.834**	1.000
TX90P	−0.846**	−0.661**	−0.653**	−0.443**	0.454**	0.232	0.818**	0.839**
TR20	−0.788**	−0.726**	−0.620**	−0.101	0.328*	0.062	0.854**	0.878**
TNx	−0.665**	−0.612**	−0.493**	−0.247	0.470**	0.229	0.726**	0.739**
TXx	−0.790**	−0.725**	−0.624**	−0.103	0.328*	0.062	0.856**	0.879**
GSL	−0.857**	−0.671**	−0.743**	−0.199	0.365**	0.174	0.742**	0.771**
CSDI	0.344**	0.627**	0.641**	0.370**	−0.472**	−0.481**	−0.300*	−0.318*
WSDI	−0.733**	−0.508**	−0.477**	−0.290*	0.385**	0.203	0.628**	0.643**

指数	TX90P	TR20	TNx	TXx	GSL	CSDI	WSDI
TX90P	1.000						
TR20	0.759**	1.000					
TNx	0.735**	0.787**	1.000				
TXx	0.762**	1.000**	0.792**	1.000			
GSL	0.739**	0.667**	0.494**	0.671**	1.000		
CSDI	−0.255*	−0.272*	−0.249	−0.274*	−0.317*	1.000	
WSDI	0.812**	0.661**	0.619**	0.662**	0.638**	−0.174	1.000

气温变化趋势一致,但大部分指数变化幅度较新疆和全国更低,这可能是由于研究时段差异造成的。气温变化受多种复杂因素的影响,大气环流是影响哈密市极端气温变化的主要原因之一。丁之勇等[15]研究发现北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)和厄尔尼诺-南方涛动指数(ENSO)均对北疆地区极端气温变化有着不同程度影响。其中AO与极端指数之间的变化具有显著相关性,在冬季与我国35°N以北地区地表气温异常变化存在显著的同向变化关系,AO指数升高会导致我国北方地区发生寒潮频次减少,进而促使哈密市冬季气温上升。然后是地形影响,天山自西向东横亘于哈密市,地形中间高南北低,研究区内雪山冰川、森林草地、戈壁大漠地形复杂。徐用兵等[22]研究表明各极端气温指数变化与地形和海拔高度关系密切。在本研究中,十三间房、哈密等极端气温指数变化明显的区域,都位于天山山脉南坡,极端气温变化显然受地形坡面影响。其次是城市化[23]的影响,随着人口的增长和工业化、城镇化的不断发展,自然环境遭到破环而人类向外排放的温室气体持续增加,使得哈密市的温度逐年呈上升趋势。除此之外,太阳黑子[24]、云量[25]和纬度[26]等因素也对极端气温变化有着不同程度的影响。极端气温事件(极端低温、极端高温)对社会和生态系统都有着严重的破坏性,因此研究哈密市过去极端气温变化趋势,并预测未来极端气温发生的频率和强度,对有效应对未来极端气温事件变化具有重要作用。

本文仅对哈密市极端气温的时空变化进行详细分析,由于资料有限,对于其影响因素的研究还不够全面,所以,针对哈密市极端气候事件影响因素仍需进一步研究。

4.2 结论

(1) 时间特征,哈密市极端气温指数变化具有不对称性,冷暖指数变化相反,冷指数除TNn和TXn外均下降,暖指数均持续上升,大部分暖指数变化幅度大于冷指数,夜指数变暖幅度大于昼指数。季

节上看，大部分极端气温指数在夏季、秋季变化幅度更大，表明近60 a来哈密市炎夏事件发生的频率呈上升趋势。

（2）空间特征，近60 a来哈密市极端低温事件频率显著降低，其中FD0下降最为显著，空间表现为自东向西递减，强度增强较弱，只有33%~50%的站点通过0.05显著性检验；极端高温事件频率增加、强度显著增强，TR20增加最为显著，高值区在十三间房、淖毛湖，低值区在巴里坤、哈密、伊吾和红柳河；极端持续事件GSL与WSDI变化幅度趋于一致，CSDI变化相反。

（3）突变时间，极端气温冷指数对气候变化更为敏感，突变发生在1985年和1995年左右，暖指数（SU25、TN90P、TX90P、TR20、TNx、TXx）和持续指数（GSL、WSDI）突变时间在1990—1999年之间。

（4）主成分分析结果表明2个主成分累计方差贡献率为76.453%，相关分析也表明各指数间具有较好的相关性，其中极端气温事件变化与气温变暖相关性较高，冷暖指数呈负相关，TN10P、TX10P、FD0、TN90P、TX90P主成分是哈密气温升高的主要因素。

参考文献（References）

[1] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(增刊2): 44–48. [Fan Xing, Qin Yuanyuan, Gao Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 Working Group Ⅰ Report [J]. Environmental Protection, 2021, 49(Suppl. 2): 44–48.]

[2] 赵军, 师银芳, 王大为, 等. 1961—2008年中国大陆极端气温时空变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 52–56. [Zhao Jun, Shi Yinfang, Wang Dawei, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperatures in China during 1961—2008[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3): 52–56.]

[3] 吕婷, 武胜利, 刘强吉, 等. 1952—2013年吐鲁番市极端气温变化规律研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 606–614. [Lü Ting, Wu Shengli, Liu Qiangji, et al. Variations of extreme temperature in Turpan City, Xinjiang during the period of 1952—2013[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 606–614.]

[4] 曹永强, 李维佳. 辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7276–7287. [Cao Yongqiang, Li Weijia. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in Liaoning Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7276–7287.]

[5] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111 (D5): D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

[6] Song X, Zhang Z, Chen Y, et al. Spatiotemporal changes of global extreme temperature events (ETEs) since 1981 and the meteorological causes[J]. Natural Hazards, 2014, 70(2): 975–994.

[7] 郑景云, 郝志新, 方修琦, 等. 中国过去2000年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 3–12. [Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Fang Xiuqi, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China[J]. Progress in Geograohy, 2014, 33(1): 3–12.]

[8] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 36–46. [Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zhihong, et al. Response of seasonal extreme temperatures in China to the global warming slow down[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 36–46.]

[9] 齐月, 陈海燕, 房世波, 等. 1961—2010年西北地区极端气候事件变化特征[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 963–969. [Qi Yue, Chen Haiyan, Fang Shibo, et al. Variation characteristics of extreme climate events in northwest China during 1961—2010[J]. Joumal of Arid Meteomlogy, 2015, 33(6): 963–969.]

[10] 曲姝霖, 仝纪龙, 唐睿, 等. 西北地区极端高温变化及其对气候变暖停滞的响应[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(4): 78–85. [Qu Shulin, Tong Jilong, Tang Rui, et al. Changes in the extremely high temperature in northwest China and its response to the stagnation of global warming[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(4): 78–85.]

[11] 张慧琴, 杨艳玲, 余华. 新疆吐鲁番60 a气温变化基本特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 600–603, 634. [Zhang Huiqin, Yang Yanling, Yu Hua. Temperature changes characteristic of Turpan in recent 60 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(4): 600–603, 634.]

[12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 58–60. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnostic and forecasting techniques[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016: 58–60.]

[13] 张延伟, 葛全胜, 姜逢清, 等. 北疆地区1961—2010年极端气温事件变化特征[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 296–302. [Zhang Yanwei, Ge Quansheng, Jiang Fengqing, et al. Evolution characteristics of the extreme high and low temperature event in north Xinjiang in 1961—2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(2): 296–302.]

[14] 高婧, 李胜楠, 井立红, 等. 新疆塔城地区极端气温变化特征及其影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 346–359. [Gao Jing, Li Shengnan, Jing Lihong, et al. Varialility characteristics of extreme temperature and its influencing factors in Tacheng Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 346–359.]

[15] 丁之勇, 葛拥晓, 吉力力·阿不都外力. 北疆地区近53年极端气温事件及其影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2018, 9(2): 159–171. [Ding Zhiyong, Ge Yongxiao, Abuduwaili Jilili. Spatiotempo-

ral variation characteristics of extreme temperature and its influencing factors in recent 53 years in northern Xinjiang, China[J]. Journal of Earth Environment, 2018, 9(2): 159-171.]

[16] 赵明玉, 武胜利, 任耀军, 等. 近58 a新疆巴州极端气温事件变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 612-622. [Zhao Mingyu, Wu Shengli, Ren Yaojun, et al. Variation characteristics of extreme temperature events in Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Xinjiang in recent 58 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 612-622.]

[17] Wang B, Zhang M, Wei J, et al. Changes in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, northwest China, during 1960—2009[J]. Quaternary International, 2013, 298: 141-151.

[18] You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961—2005[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D07101, doi: 10.1029/2007jd009389.

[19] Wang Q, Wang M, Fan X, et al. Trends of temperature and precipitation extremes in the Loess Plateau region of China, 1961—2010 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(3): 949-963.

[20] 汪宝龙. 1960—2009年新疆极端气温和降水事件的变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013. [Wang Baolong. Study in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang, northwest China during 1960—2009[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.]

[21] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353. [Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 337-353.]

[22] 徐用兵, 雷秋良, 周脚根, 等. 1960—2015年云南省极端气候指数变化特征研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(11): 15-27. [Xu Yongbing, Lei Qiuliang, Zhou Jiaogen, et al. Study on the change characteristics of extreme climate indices from 1960 to 2015 in Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(11): 15-27.]

[23] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1589-1598. [Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in north China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(6): 1589-1598.]

[24] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 990-998. [Zhang Qiang, Han Yongxiang, Song Lianchun. The summarize of development of global climate change and its effect factors[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(9): 990-998.]

[25] 齐贵英. 近47年阿勒泰地区云量气候变化特征分析[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(18): 153-155. [Qi Guiying. Analysis on variation characteristics of the cloudiness in recent 47 years in Aletai area[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2010, 16(18): 153-155.]

[26] 任景全, 郭春明, 刘玉汐, 等. 1961—2015年吉林省极端气温指数时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3224-3234. [Ren Jingquan, Guo Chunming, Liu Yuxi, et al. Spatiotemporal change characteristics of extreme temperature indices in Jilin Province during 1961—2015[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3224-3234.]

Spatial and temporal variation characteristics of extreme temperatures in Hami City in the past 60 years

CHEN Yueping[1,2], WU Shengli[1,2], ZHAO Xin[1,2], ZHANG Yijia[1,2]

(1. School of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Areas, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: The meteorological data of the daily maximum and minimum temperatures of Hami City National Meteorological Reference Station, Xinjiang, China from 1961 to 2019 were selected to predict future temperature changes in the city. The spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature in Hami City were analyzed using the univariate linear regression method, 10 a moving average, Mann-Kendall method, moving *t* test, and principal component analysis method, which provided a certain basis for determining the future temperature trend, enhancing the city's ability to respond to extreme temperature events, and reducing the harm caused by meteorological disasters to agricultural production in Hami City. The results showed the following: (1) The change in the extreme temperature index in Hami City is asymmetric, the change in cold and warm indexes is opposite, and the warming amplitude of the night index is greater than that of the day index. Seasonally, most extreme temperature indices vary more widely in summer and autumn. (2) In the past 60 years, the frequency of extreme low-temperature events in Hami City decreased significantly, among which frost days decreased most significantly, with a decrease of $-4.59\ \mathrm{d\cdot(10a)^{-1}}$. The frequency and intensity of extreme heat events have increased significantly. The growth season length tends to be consistent with the change of the thermal persistence index, while the change of the cold persistence index is the opposite. (3) The extreme temperature and cold indices are more sensitive to climate change. The abrupt changes occurred in the mid-1980s and the late 1990s, and the abrupt changes in the warm and persistent indices occurred in the late 1990s. (4) The cumulative variance contribution rate of the two principal components was 76.453%, the correlation between extreme temperature events and temperature warming was high, and the cold and warm index was negatively correlated. Cold nights, cold days, frost days, warm nights, and warm days were the main factors for the temperature increase in Hami City.

Key words: extreme temperature index; temporal and spatial variation; mutation test; Hami City